

出口通道背部摩擦力对工业纯钛 室温 ECAP 变形影响的有限元分析

杨西荣, 吕梦南

(西安建筑科技大学冶金工程学院, 陕西 西安 710055)

摘要: 工业纯钛的等径弯曲通道变形(Equal Channel Angular Pressing, 简称 ECAP)通常在 350~450℃实现, 为研究工业纯钛室温 ECAP 变形的可行性, 提高其细化效率, 本文利用三维有限元商品软件 Marc, Superform 对工业纯钛方形试样的一道次室温 ECAP 变形过程进行模拟. 研究并分析了模具出口通道背面摩擦对工业纯钛(Commercial Pure Titanium, CP-Ti)试样变形、应变速率及挤压载荷分布的影响规律. 研究表明 增大模具出口通道背部摩擦可使工业纯钛 ECAP 变形区的应变速率分布更均匀, 使试样内应变分布均匀性提高. 在此基础上通过改善外部摩擦工艺条件成功地实现工业纯钛室温 ECAP 变形, 获得变形均匀的 ECAP 试样.

关键词: ECAP; 三维有限元分析; 背面摩擦力; 工业纯钛

中图分类号: TG376

文献标志码: A

文章编号: 1006-7930(2011)05-0720-05

等径弯曲通道变形(Equal Channel Angular Pressing, 简称 ECAP)是一种能够获得纯剪切变形的强烈塑性变形法. 它是将试样放入横截面形状完全相同, 并成一定角度的弯曲通道中, 在外加载荷的作用下使试样在通道弯曲处产生一定量均匀纯剪切变形的强烈塑性变形方法. 目前许多研究者采用 ECAP 变形方法已在面心立方结构金属(如: 铝及铝合金、铜及铜合金等)、体心立方结构金属(如: 纯铁、低碳钢等)及密排六方金属(如钛及合金等)数十种材料中获得了亚微晶或纳米晶组织^[1]. 相对较软的立方金属(如铝和铜)一般容易在室温实现 ECAP 变形, 而对于滑移系较少的难变形金属(如钛)很难在室温实现 ECAP 变形. Semiatin 等人^[2]研究表明, 在 25℃、125℃和 225℃等较低的温度下进行 ECAP 变形时, 工业纯钛试样均会出现严重开裂, 而当温度达到 325℃时, 在适当的变形速度下, 可获得表面光滑而无裂纹的试样. 目前工业纯钛的 ECAP 变形都是在 350~450℃下获得的, 但高的变形温度使晶粒细化效果变差, 强化效率降低. 因此如何通过改进 ECAP 变形工艺条件, 使工业纯钛材在室温实现 ECAP 变形是目前所面临的具有挑战性的课题.

有限元分析法(Finite Element Method, 简称 FEM)已被用来研究 ECAP 变形模具几何参数(如外圆角^[3-7]、通道夹角^[8])、工艺参数(如背压力^[9-10]、变形方式^[7, 11])及材料特性(如应变硬化速率^[9])对 ECAP 变形试样的变形行为、应变分布及负载分布等的影响规律. 在众多的工艺影响因素(摩擦、温度、应变速度率、变形材料本构关系、道次及工件形状比等)中, 摩擦是一个重要的影响因素, 它会影响到试样的整个变形行为、应变分布以及负载分布. 摩擦对 ECAP 变形行为影响早期已有报道^[4-6, 9, 12-18], 但报道的结果相互矛盾, Prangnell 等^[17]研究认为摩擦会使得应变分布和变形不均匀性增加; 而 Yang 和 Lee^[4]则认为对于应变硬化材料摩擦是不会影响变形均匀性的; Li 等^[18]认为摩擦对试样应变的影响可忽略; Dumoulin^[6]则根据定义的均匀性恒定因子评判得出摩擦可使变形均匀性增加. 进一步的研究发现这些研究所采用的摩擦模型不同, 因此 Balasundar 和 Raghu 采用不同摩擦模型对 ECAP 变形进行模拟分析^[19], 认为采用剪切摩擦模型可正确分析 ECAP 的变形过程. 本文旨在利用三维有限元分析法研究不同通道背部摩擦条件对一道次的工业纯钛室温 ECAP 变形均匀性的影响, 以期通过改变外部工艺条件实现工业纯钛室温 ECAP 变形.

收稿日期: 2010-12-23 修改稿日期: 2011-08-03

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(50874086); 陕西省自然科学基金资助项目(2009JM6001)

作者简介: 杨西荣(1971-), 陕西西安人, 工学博士, 副教授, 主要从事材料加工及其计算机模拟研究.

2 三维有限元模型

本文模拟所采用的模具外形尺寸是外圆角 $\psi=20^{\circ}$, 通道夹角 $\phi=120^{\circ}$, 通道采用 $15\text{ mm}\times 15\text{ mm}$ 的方形断面 (如图 1 所示).

在模拟过程中, 挤压模具和挤压杆被看做是刚性体, 其中挤压模被分为两部分, 即相对于转角的通道背面和背面以外的其余部分, 而挤压试样为可变形体, 尺寸规格为 $15\text{ mm}\times 15\text{ mm}\times 70\text{ mm}$, 试样材料为工业纯钛, 泊松比为 0.32, 正弹性模量为 112 Gpa, 密度为 4.5 g/cm^3 , 模拟时材料的本构方程由压缩实验获得 (图 2). 试样的网格划分采用 8 节点六方等参单元, 由系统自动划分, 划分结点总数为 6 336 个, 单元总数为 5 170 个. 用固定位移模式做为模拟控制条件, 以比较不同背摩擦力对变形的影响效果. 试样变形时的挤压速度是 2 mm/s , 挤压温度是室温 (20°C), 采用弹塑性模型. 图 3 为 ECAP 变形模拟完成后试样的 (X 、 Y 、 Z) 方向定义.

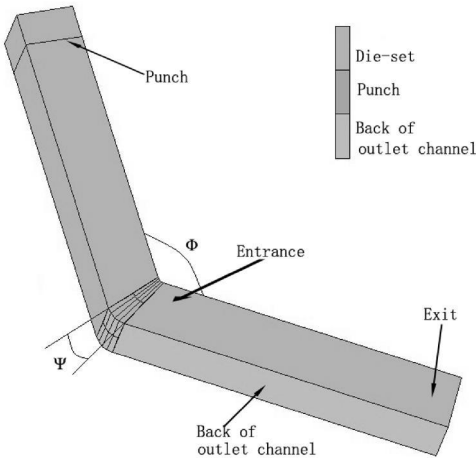


图 1 模拟用模型
Fig. 1 Model for simulation

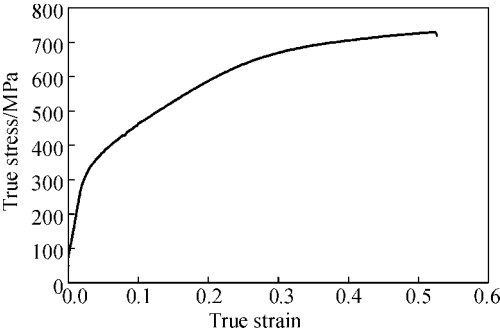


图 2 工业纯钛室温压缩的真应力应变曲线
Fig. 2 The stress-strain curves of annealed CP-Ti at room temperature

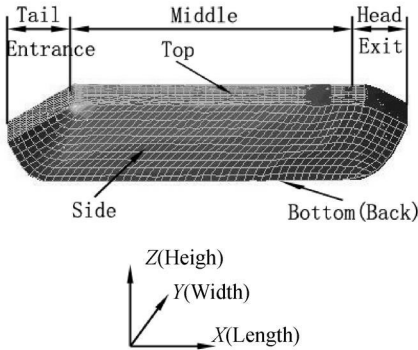


图 3 变形试样的 (X 、 Y 、 Z) 方向的定义
Fig. 3 The defined direction (X , Y , Z) of deformation sample

模拟时, 采用剪切摩擦模型, 整个通道 (除背面外) 摩擦系数 $\mu=0.1$, 通道背部摩擦系数 f 分别为 0.05, 0.1, 0.15, 0.2, 0.25, 0.3.

3 模拟和试验结果及分析

3.1 等效应变分布

图 4 是出口通道背部不同摩擦条件下变形试样宽度方向中间切面的等效应变分布图. 由图可知:

(a) 沿着试样的长度方向 (X 方向), 变形区可以被分为三个区域: 即头部、中间和尾部 (图 3). 试样的等效应变在变形区中间部分较头部和尾部较大, 且变形分布更均匀.

(b) 随出口通道背面摩擦的增加, 试样上表面与模具间的缝隙逐渐减小, 试

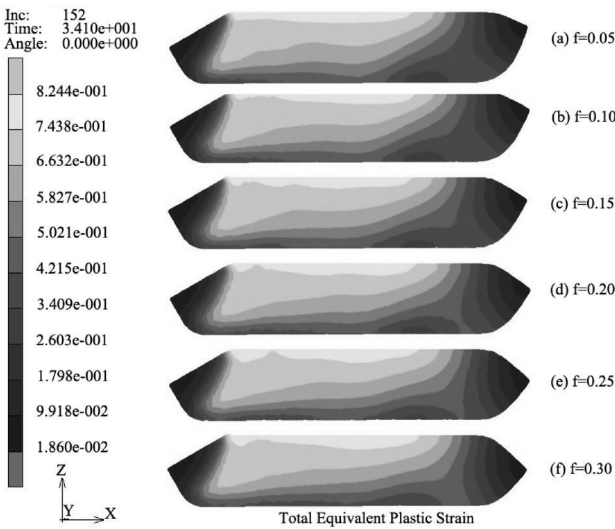


图 4 不同背部摩擦条件下 ECAP 试样 Y 方向中间切面的等效应变分布

Fig. 4 The distribution of total equivalent plastic strain in middle Y -plane of ECAP with different friction coefficient between the back of the exit channel and workpiece

样头部上表面与模具间的缝隙逐渐增大,变形试样头部的尖角逐渐向下表面(背部)靠近,主要是因为随通道背部摩擦的增加,下侧(背部)金属的流动阻力变大,从而减小了上下表面金属的流动速差,使金属不均匀流动引起的附加拉应力减小;

(c)随出口通道背面摩擦的增加,主变形区的体积增大,试样单道次变形的等效应变平均值略有增加,整体应变分布更均匀,这可从试样切面背部最小应变分布区域的逐渐减小直到消失得到证实.

3.2 等效应变速率分布

出口通道背部采用不同摩擦系数时,ECAP 试样塑性变形区分布规律如图 5 所示.

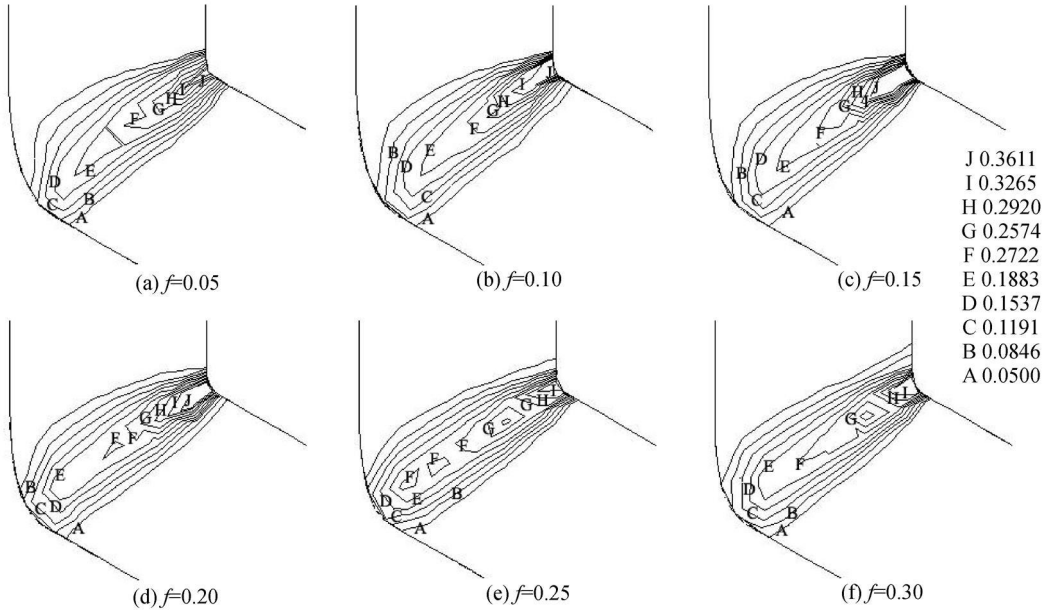


图 5 不同背部摩擦条件下 ECAP 变形模拟的等效应变速率分布(Step 80)

Fig.5 Distribution of equivalent plastic strain rate of ECAP with different friction coefficient between the back of the exit channel and workpiece (Step 80)

(a)随出口通道背部摩擦的增加,塑性变形中的应变速率分布区域逐渐减小,分布区域向近似条带状转变.

(b)随出口通道背部摩擦的增加,塑性变形区中的应变速率分布区域的对称性逐渐增加.

(c)随出口通道背部摩擦的增加,高应变速率分布的区域逐渐增加,贯穿整个交叉面(剪切面)的应变速率也逐渐增多,也就是说,应变速率沿交叉面的分布均匀性随出口通道背部摩擦的增大而增加.

图 6 是出口通道背部摩擦对剪切面的影响,图中横座标表示剪切面上计算点到内角距离.整体上来看,随出口通道背部摩擦的增加,内圆角处等效应变速率逐渐降低;而靠近外圆角处的应变速率明显升高,且随背部摩擦的增加,试样中间部分的分布曲线越来越平缓,即存在应变速率基本保持不变的区域.由以上分析知,随出口通道背部摩擦的增加,ECAP 塑性变形区变窄,剪切变形程度提高,应变速率分布均匀性增加.

3.3 挤压力

图 7 是不同出口通道背部摩擦条件下工业纯钛 ECAP 变形过程的载荷-时间曲线.

由图可知:

(a)挤压载荷曲线上的第 II 阶段载荷从极大值开始逐渐降低,然后再逐渐增大,但随出口通道背部摩擦系数的增加挤压载荷的降低幅度减小,到背部摩擦系数 $f=0.30$ 时,第 II 阶段载荷几乎不下降.

(b)当出口通道背部摩擦系数($f=0.05$)小于模具其他部分摩擦系数时,挤压载荷分布曲线出现载荷突然急剧升高的第 III 区,在载荷区线上形成明显台阶.

(c)当出口通道背部摩擦系数大于模具其他部分摩擦系数时,挤压载荷逐渐升高,且随出口通道背部摩擦的增加,载荷升高的幅度有所增加,挤压载荷最大值有所增加.这对挤压工具的要求增加,但对试

样的受力状况是有利的, 可以获得较直的变形试件.

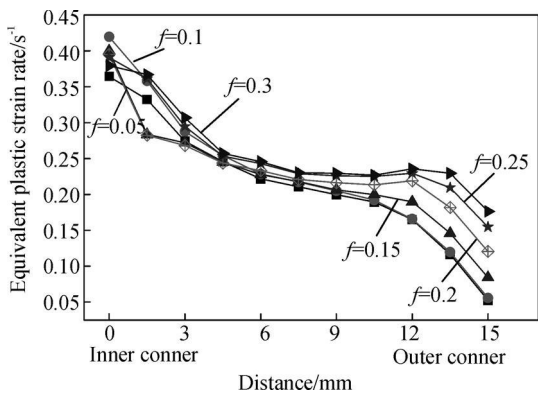


图 6 出口通道背部摩擦对应变速率在剪切面分布的影响

Fig. 6 The effect of friction coefficient between the back of the exit channel and workpiece on the distribution of strain rate from the inner corner to outer corner along the intersection line of the two channels for CP-Ti

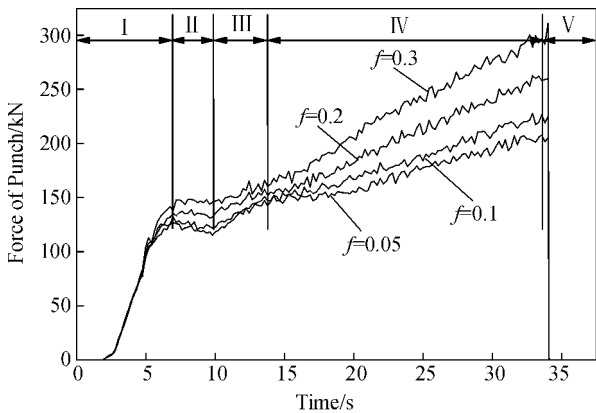


图 7 不同出口通道背部摩擦条件下 ECAP 挤压载荷分布

Fig. 7 Extrusion load curves for ECAP with different friction coefficient between the back of the exit channel and workpiece

3.4 实验结果

根据模拟结果, 通过控制 ECAP 模具出口通道背部摩擦, 采用 120° 模具以 2 mm/s 的挤压速度在室温成功实现工业纯钛的 ECAP 变形, 变形前后的试样 (断面为 $15\text{ mm} \times 15\text{ mm}$) 如图 8 所示.

实验所得挤压杆的挤压力范围为 $160 \sim 300\text{ kN}$, 而模拟所得挤压杆所受的挤压力约为 $156 \sim 320\text{ kN}$, 实验结果与模拟结果非常接近.

4 结 论

增大 ECAP 模具出口通道背部的摩擦可提高 ECAP 变形区的应变速率均匀性, 以及应变分布的均匀性. 在模拟的基础上, 通过控制 ECAP 模具出口通道背部摩擦, 采用 120° 模具以 2 mm/s 的挤压速度在室温成功实现了工业纯钛的 ECAP 变形, 获得了表面光滑无裂纹的 ECAP 变形试样.

参考文献 References

[1] P 瓦利耶夫, H B 亚历克山卓夫. 剧烈塑性变形纳米材料[M]. 林伯年, 译. 北京: 科学出版社, 2006.
R Z Valiev, I V Alexandrov. Nanostructured materials from severe plastic deformation[M]. LIN Bo-nian, Translated. Beijing: Science press 2006.

[2] SEMIATIN S L, SEGAL V M, GOFORTH R E. Workability of commercial- purity titanium and 4340 steel during equal channel angular extrusion at cold-working temperatures[J]. Metal Mater Trans, 1999, 30A(5): 1425-1436.

[3] RAGHAVAN Srinivasan. Computer simulation of equal channel angular extrusion process[J]. Scripta Mater, 2001, 44: 91-96.

[4] YANG Yi-lang, Shyong Lee. Finite element analysis of strain conditions after equal channel angular pressing[J]. J Mater Process Technol, 2003, 140: 583-587.

[5] A V Nagasekhar, Yip Tick-Hon. Optimal tool angles for equal channel angular extrusion of strain hardening mate-

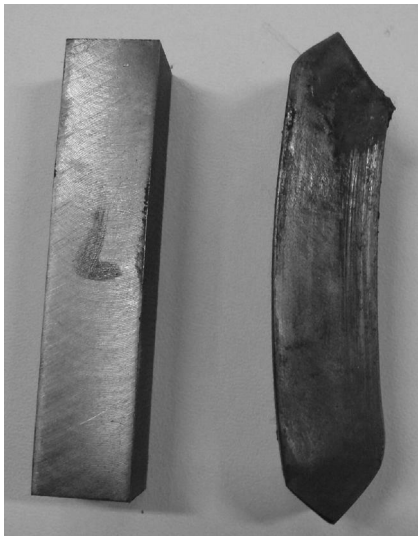


图 8 工业纯钛原始样和 $\Phi=120^\circ$ 模具室温 ECAP 变形试样

Fig. 8 Samples of CP-Ti received and pressed using $\Phi=120^\circ$ die

- rials by finite element analysis[J]. *Compos Mater Sci*, 2004, 30: 489-495.
- [6] S Dumoulin, H J Roven, J C. Werenskoid, et al. Finite element modeling of equal channel angular pressing: effect of material properties, friction and die geometry[J]. *Mater Sci Eng*, 2005, A410-411: 248-251.
- [7] SU C W, LU L, LAI M O. 3D Finite element analysis on strain uniformity during ECAP process[J]. *Mater Sci Technol*, 2007, 23: 727-735.
- [8] SEUNG Chae Yoon, HYOUNG Seop Kim. Finite element analysis of the effect of the inner corner angle in equal channel angular pressing[J]. *Mater Sci Eng*, 2008, A490: 438-444.
- [9] S J Oh, S B Kang. Analysis of billet deformation during equal channel angular pressing[J]. *Mater Sci Eng*, 2003, A343: 107-115.
- [10] H-Heon Son, Jeong-Ho Lee, Yong-Taek Im. Finite element investigation of equal channel angular extrusion with back pressure[J]. *J Mater Process Technol*, 2006, 171: 480-487.
- [11] TAO Suo, YULONG Li, Qion Deng, et al. Optimal pressing route for continued equal channel pressing by finite element analysis[J]. *Mater Sci Eng*, 2007, A466: 166-171.
- [12] RUSLAN Z Valiev, T G Langdon. Principles of equal channel angular pressing as processing tool for grain refinement[J]. *Prog Mater Sci*, 2006, 51: 881-981.
- [13] AZUSHIMA A, KOOP R, KORHONEN A, et al. Severe plastic deformation processes for metals[J]. *CIRP Annals - Manuf Technol*, 2008, 57: 716-735.
- [14] SEUNG Chae Yoon, MIN Hong Seo, A Krishnaiah, et al. Finite element analysis of rotary-die equal channel angular pressing[J]. *Mater Sci Eng*, 2008, A 490: 289-292.
- [15] S C Yoon, P Quang, S I Hong, et al. Die design for homogenous plastic deformation during equal channel angular pressing[J]. *J Mater Process Technol*, 2007, 187-188: 46-50.
- [16] XU Shu-bo, ZHAO Guo-qun, MA Xin-wu, et al. Finite element analysis and optimization of equal channel angular pressing for producing ultra-fine grained materials[J]. *J Mater Process Technol*, 2007, 184: 209-216.
- [17] PRANGNELL P B, HARRIS C, ROBERTS S M. Finite element modeling of equal channel angular extrusion[J]. *Scripta Mater*, 1997, 37(7): 983-989.
- [18] LI S, BROUKE M A M, BEYERLEIN I J, et al. Finite element analysis of the plastic deformation zone and working load in equal channel angular extrusion[J]. *Mater Sci Eng*, 2004, 382(1-2): 217-236.
- [19] BALASUNDAR I, RAGHU T. Effect of friction model in numerical analysis of equal channel angular pressing process[J]. *Mater Design*, 2010, 31: 449-457.

Effect of friction between the back of the billet and outlet channel on the finite unit analysis of ECAP for CP-Ti at ambient temperatures

YANG Xi-rong, LV Meng-nan

(School of Metallurgy Engineering, Xi'an University Architecture & Technology, Xi'an 710055, China)

Abstract: All early investigations of equal channel pressing (ECAP) on CP-Ti were carried out in the temperature range of 623-773K. In order to evaluate the feasibility that CP-Ti was processed by ECAP without failure at room temperature, Marc Superform, a 3D finite unit model software, is used to analyze the deformation heterogeneity of commercial pure titanium (CPTi) during equal channel angular pressing (ECAP) for one pass at ambient temperature. The simulation of the total equivalent plastic strains in three perpendicular plans of the deformed billet was carried out and different friction coefficient between the back of the billet and outlet channel were employed in order to obtain uniform workpiece. This study shows that the strain homogeneity increases and the strain rate is more homogeneous with friction between the back of the billet and outlet channel. And CP-Ti may be processed by ECAP at room temperature through altering the state-of-stress of work piece.

Key words: ECAP; 3D finite element simulation; back friction; CP-Ti